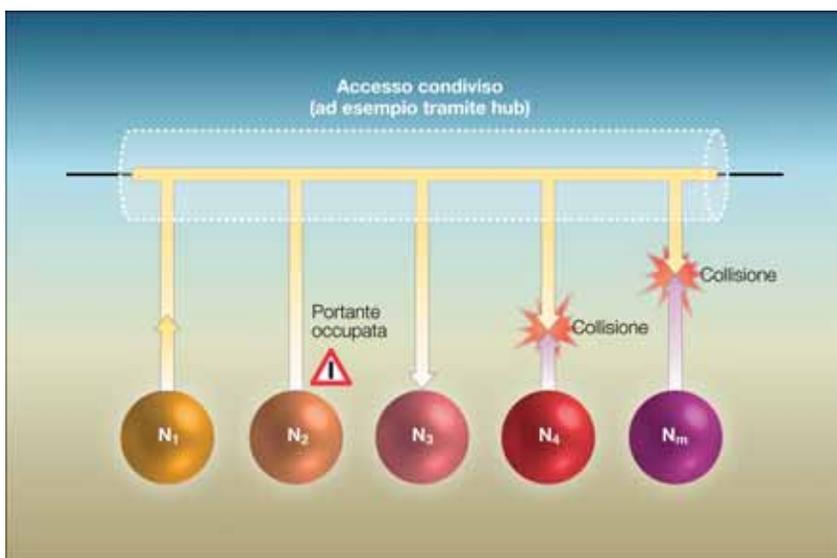


## Il determinismo con Ethernet

Con le opportune modifiche, Ethernet trova applicazione anche come bus di campo deterministico

MASSIMO GIUSSANI

La disponibilità di una tecnologia aperta e universale come Ethernet ha influito in maniera significativa sull'evoluzione delle reti di comunicazione aziendali e industriali. Le economie di scala derivanti dalla sua amplissima diffusione hanno permesso di abbattere i costi dei chip di interfaccia e di tutti i componenti dell'infrastruttura di rete, aggiungendo l'ulteriore bonus di una naturale compatibilità verso le reti di ufficio e la rete Internet in generale. Le soluzioni basate su Ethernet sono tipicamente caratterizzate da elevata scalabilità, alte velocità di trasferimento dati e bassi costi di progettazione e manutenzione. Tuttavia, le reti industriali presentano delle esigenze ben diverse dalle comuni reti aziendali, tanto sul piano del tipo di comunicazione che devono sostenere (i bus di campo privilegiano lo scambio frequente di piccole quantità di dati soggette a ben precisi vincoli temporali) quanto nelle caratteristiche di robustezza meccanica ed elettrica. Varianti robuste dello standard hanno cominciato a fare la loro comparsa verso la fine degli anni novanta, caratterizzate dall'impiego di connettori di grado industriale e dall'aggiunta di strati di livello superiore ottimizzati per gestire il flusso di dati tipico in applicazioni di



La gestione delle collisioni del protocollo CsmA/Cd rendeva Ethernet impronibile nelle applicazioni di tipo deterministico

automazione e controllo di processo. In questo ambito, l'aspetto più critico dell'impiego di Ethernet era rappresentato dagli elevati valori di jitter associati ai meccanismi non deterministici di risoluzione della contesa e all'imprevedibilità dei ritardi per effetto del traffico di rete. Con il passare degli anni si sono affermate nuove varianti che hanno affrontato il problema del determinismo in varia maniera: talune utilizzando meccanismi di controllo negli strati superiori, altre aggiungendo un meccanismo deterministico di risoluzione della contesa nello strato MAC.

automazione e controllo di processo. In questo ambito, l'aspetto più critico dell'impiego di Ethernet era rappresentato dagli elevati valori di jitter associati ai meccanismi non deterministici di risoluzione della contesa e all'imprevedibilità dei ritardi per effetto del traffico di rete. Con il passare degli anni si sono affermate nuove varianti che hanno affrontato il problema del determinismo in varia maniera: talune utilizzando meccanismi di controllo negli strati superiori, altre aggiungendo un meccanismo deterministico di risoluzione della contesa nello strato MAC.

## L'importanza del determinismo

In linea di massima una rete di comunicazione si dice deterministica quando è in grado di assicurare che tutti i suoi nodi vengano aggiornati in una sequenza predeterminata e entro limiti temporali ben precisi. Il determinismo gioca un ruolo essenziale in applicazioni industriali come il controllo assi nelle macchine utensili: in questo caso è chiaro come il trasferimento dati non possa tollerare né ritardi, né anticipi, pena l'errato posizionamento dell'utensile.

Il determinismo non va confuso con la capacità, legata al contesto applicativo, di fornire una risposta 'in tempo reale'. Una rete può benissimo essere deterministica ma al contempo risultare troppo lenta per consentire lo svolgimento in tempo reale di determinate funzioni (ad esempio potrebbe non essere in grado di veicolare tutte le informazioni associate a un sistema di controllo basato sulla visione artificiale). E se la velocità non è un problema per Ethernet, il retaggio del meccanismo originale per il controllo dell'accesso al mezzo ha richiesto ai progettisti maggiori sforzi concettuali per poter essere aggirato. Nella sua forma originaria su bus condiviso Ethernet utilizza CsmA/Cd, un meccanismo di accesso multiplo con rilevamento della portante e delle collisioni che di fatto

ritorna a perdere dei messaggi. Questo comportamento, per quanto improbabile, può accadere nei protocolli di tipo 'editore-abbonato' o 'produttore-consumatore' come Ethernet IP.

## Tdma: ogni cosa a suo tempo

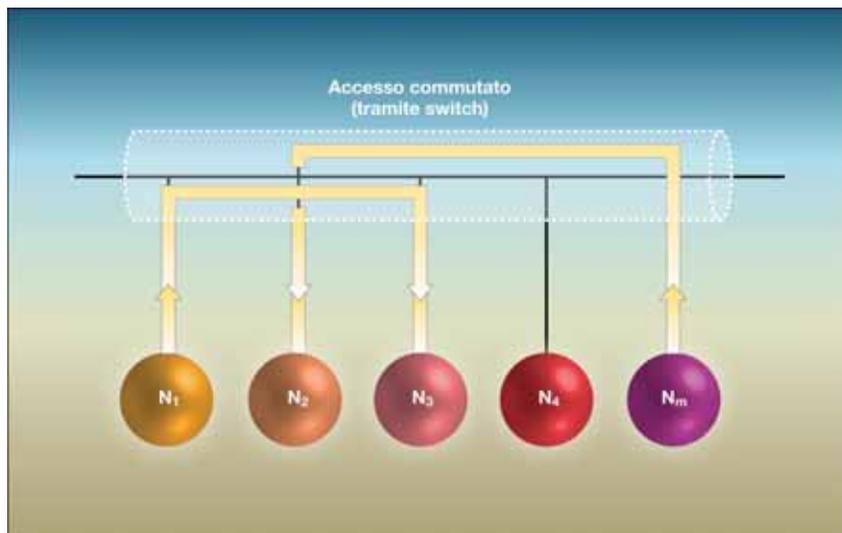
Il metodo forse più intuitivo per assicurare il determinismo temporale aggirando l'aleatorietà della contesa a rilevamento delle collisioni di CsmA/Cd consiste nel sincronizzare la trasmissione delle informazioni per mezzo di un segnale di clock condiviso. La modalità di accesso per divisione di tempo (Tdma, Time Division Multiple Access) consente una sincronizzazione della rete a livello globale assegnando a ciascun nodo uno slot temporale entro il quale potrà trasmettere i dati senza dover contendere il mezzo e usufruendo di tutta la banda disponibile.

L'organizzazione americana che riunisce gli ingegneri del settore automobilistico SAE (Society of Automotive Engineers) ha realizzato un protocollo di tipo 'time-triggered' in grado di utilizzare componenti commerciali Gigabit Ethernet. Il protocollo, denominato TTP/C (Time Triggered Protocol per applicazioni in classe C), supporta topologie a bus e a stella e composizioni di queste e utilizza collegamenti ridondanti di tipo 'half-duplex'. Le trasmissioni avvengono secondo

uno schema temporale noto a priori a tutti i nodi e organizzato in 'turni' Tdma. TTP/C trova applicazione in ambito avionico (certificazione DO-178b) e ferroviario.

Più recente è l'introduzione di TTEthernet (Time-Triggered Ethernet) che è un'estensione di Ethernet, compatibile con lo standard IEEE 802.3, e che implementa una tecnica time-triggered per la sincronizzazione delle trasmissioni da parte dei nodi che fanno parte della rete.

Originariamente concepito dall'azienda viennese TTTech ComputerTechnik, che ne detiene insieme a Honeywell il brevetto, questo protocollo è in fase avanzata di standardizzazione da



**L'introduzione degli switch nelle reti a stella commutate ha permesso di eliminare le collisioni, di fatto realizzando connessioni punto-punto tra coppie di nodi, ma non ha risolto tutti i problemi di determinismo**

rende completamente aleatoria la risoluzione della contesa al mezzo.

La topologia a stella delle versioni su cavo UTP ha permesso il ricorso agli switch per eliminare il problema delle collisioni alla radice, di fatto andando a realizzare dei collegamenti di tipo punto-punto tra ciascuna coppia di nodi interlocutori. Il ricorso agli switch non è tuttavia sufficiente a garantire il determinismo in una rete Ethernet: esiste pur sempre la possibilità di un accumulo eccessivo di messaggi accodati a una porta particolarmente attiva che, in caso di 'overflow', porterebbe addi-

parte di TTA Group, nonché da parte di SAE, all'interno del progetto "Sae As6802 Time-Triggered Ethernet". Una bozza delle specifiche può essere ottenuta facendone richiesta sul sito [www.ttagroup.org](http://www.ttagroup.org).

GE Fanuc Intelligent Platforms ha scelto di aggiungere questa tecnologia deterministica nelle soluzioni che propone per il settore dell'avionica, un settore particolarmente attento alle caratteristiche di sicurezza, affidabilità, resistenza ai guasti e scalabilità. TTEthernet, che è stata progettata per prodotti cui serve la certificazione DO-178 e DO-254, rappresenta un'alternativa basata su standard

aperti alle soluzioni conformi alle norme, oramai datate, Mil-Std 1553 e Arinc 429.

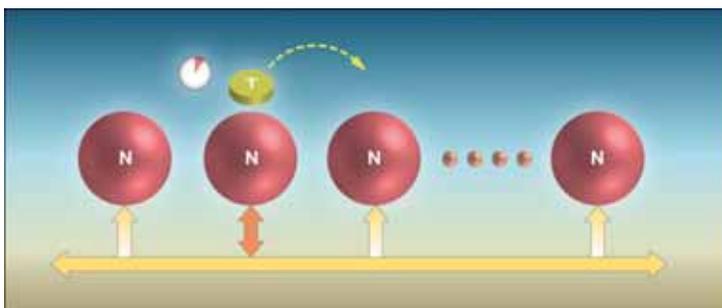
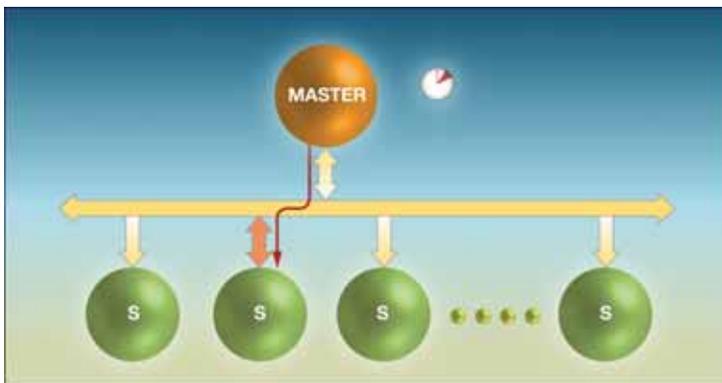
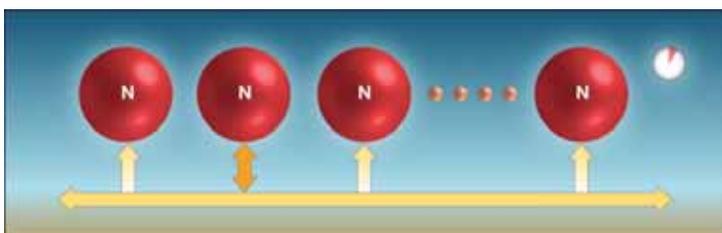
## Master-slave: la voce del padrone

Un altro modo per assicurare il determinismo consiste nell'adottare uno schema di comunicazione di tipo master-slave, in cui un nodo speciale (master) gestisce l'accesso al mezzo da parte degli altri nodi (slave). In questo caso il determinismo diventa un 'affare locale' che può

neggiamento del dispositivo master comporta infatti la compromissione dell'intera rete. Questo particolare diventa di secondaria importanza nei sistemi che offrono dispositivi master ridondanti; in questo caso il controllo del mezzo tra i diversi master viene deciso per passaggio di token, una tecnica di cui parleremo nel prossimo paragrafo.

Ethernet Powerlink (EPL) è un protocollo di rete, aperto e senza bisogni di licenze che aggiunge l'accesso deterministico in tempo reale alle reti basate su Ethernet e sulla

suite TCP/IP. EPL utilizza una tecnica di controllo di tipo master-slave per prevenire le collisioni direttamente al livello del bus. Gestito da Ethernet Powerlink Standardization Group (Epsg, raggiungibile all'indirizzo [www.ethernet-powerlink.org](http://www.ethernet-powerlink.org)), EPL utilizza un'interfaccia applicativa basta su Canopen e si presta a essere utilizzato in applicazioni che necessitino di aggiornamenti rapidi (tipicamente 100-500 ms) e di una sincronizzazione temporale precisa (jitter al di sotto del ms). Tra le applicazioni di EPL figura, non a caso, il controllo assi. La rete consiste di un dispositivo master ('manager') e diversi slave ('controlled node') che inviano ciclicamente, con tempi di aggiornamento molto brevi, informazioni divise in segmenti isocroni (cicliche) e asincroni (acicliche). Questa separazione tra le due modalità permette la coesistenza sulla stessa rete di una trasmissione asincrona che non interferisce con la temporizzazione dei trasferimenti critici. Ethercat (Ethernet for Control Automation Technology) è un altro bus di campo che si appoggia a Ethernet con un meccanismo di implementazione del determinismo di tipo master-slave. Ethercat è pensato per utilizzare componenti standard per l'infrastruttura di rete, delegando la 'specializzazione deterministica' al chip di interfaccia dei dispositivi slave e al sistema operativo in tempo reale che viene eseguito sul dispositivo master. Il risparmio per gli utilizzatori risiede nella possibilità di utilizzare economici switch commerciali (ma pur sempre cablati con cavi e connettori di grado



Tre diverse tecniche per ottenere il determinismo in un bus di comunicazione: Tdma (a), master-slave (b) e passaggio di token (c)

essere gestito in maniera indipendente tramite un'opportuna pianificazione all'interno del dispositivo dominante. Il master trasmette a tutti i nodi un messaggio contenente l'identificativo del soggetto che ha diritto di occupare il canale e solo dopo che questo messaggio di controllo è stato completamente ricevuto e decodificato è possibile dare inizio alla trasmissione. Un effetto collaterale di questo approccio è che una parte della banda viene sprecata per veicolare questi messaggi di controllo. I sistemi master-slave presentano l'ulteriore inconveniente di aggiungere un elemento sensibile di guasto: il dan-

industriale) o di farne anche a meno, utilizzando una topologia ibrida bus-stella. Il dispositivo master immette in rete un pacchetto il cui indirizzo viene letto da tutti gli slave; solo il dispositivo che ha diritto di accesso al canale vi scrive i dati. Tutte le operazioni sono eseguite in hardware e comportano pertanto un ritardo minimo (dell'ordine di ns) prima che il pacchetto venga reimpresso in rete. La stessa sincronizzazione temporale è completamente realizzata dall'hardware integrato in ciascuno slave e porta a una precisione di circa 100 ns.

## Testimoni a orologeria

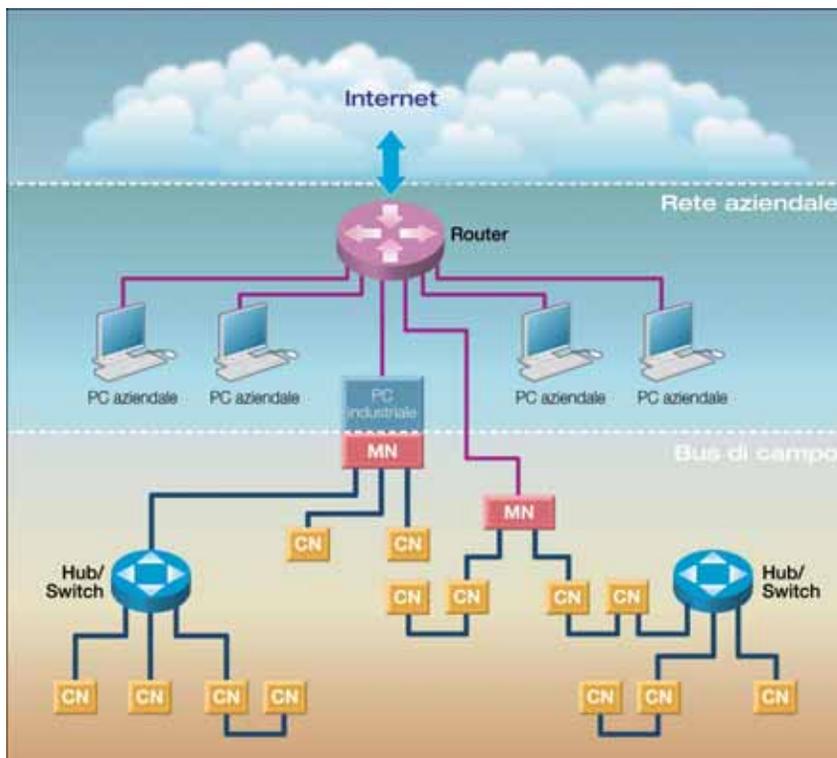
Il controllo del mezzo tramite passaggio di token, una sorta di 'testimone' che conferisce al detentore il comando della rete, permette l'implementazione di meccanismi di arbitraggio deterministico anche in quelle reti in cui non esista una gerarchia tra dispositivi. Di tutti i nodi di un sistema di controllo distribuito, solo quello che detiene il token ha il permesso di accedere in trasmissione al canale; una volta esaurito il tempo a disposizione il 'testimone' viene passato al nodo successivo secondo un ordi-

elevata; nella seconda (trasmissione) il token viene inviato al nodo prescelto che trasmette il suo messaggio e dà inizio a una nuova fase di arbitraggio.

## Convertiti al verbo di Metcalfe

Che Ethernet abbia trovato ampia accettazione anche come bus di campo è testimoniato anche dal fatto che diversi fieldbus 'tradizionali', come Foundation Fieldbus e Profibus, offrono varianti basate sul suo strato fisico. HSE (High Speed Ethernet), ad esempio, permette di utilizzare il protocollo applicativo di Foundation Fieldbus H1 affidandone il trasporto dei messaggi a uno stack TCP/IP su Fast Ethernet o Gigabit Ethernet. Grazie al meccanismo di incapsulamento, HSE trasporta su Ethernet tutte le funzionalità tipiche di Foundation Fieldbus H1, come la caratterizzazione dei dispositivi per mezzo di descrittori e il riconoscimento delle periferiche immesse in rete. Una rete HSE è suddivisa in segmenti full duplex dotati di uno scheduler che si occupa di garantire il determinismo temporale. Tutti gli scheduler sono sincronizzati sulla base di un clock comune. La sincronizzazione delle comunicazioni avviene con un meccanismo di tipo 'editore-abbonato': un nodo (ad esempio un'interfaccia HMI) che abbia 'sottoscritto un abbonamento' a una particolare trasmissione dati (ad esempio di un sensore) la riceverà in base a una pianificazione temporale predefinita

dallo scheduler. Profinet è un protocollo deterministico che getta un ponte tra i bus di campo tradizionali (supporta dispositivi Profibus, Interbus, Modbus, ASi e Devicenet) e la tecnologia Ethernet. Lo standard supporta tre diverse versioni, che si differenziano per la crescente enfasi sui vincoli di sincronizzazione temporale. La versione V1 è adatta a comunicazioni non soggette a stringenti vincoli temporali e utilizza un meccanismo di comunicazione NRT (non realtime), basato su Ethernet via TCP e UDP. La versione V2, nota come Profinet RT (realtime), utilizza ancora elementi Ethernet standard e si presta alla realizzazione di sistemi di controllo con tempi di aggiornamento compresi tra 1 e 100 ms. La terza versione, Profinet IRT (isochronous realtime), richiede circuiti di interfaccia non standard ma è in grado di garantire tempi di ciclo inferiori a 1 ms e jitter al di sotto del ms.



**Ethernet PowerLink permette di combinare diversi tipi di topologie di rete, utilizzando hub e switch Ethernet standard per configurazioni a stella o combinazioni di 'nodi manager' (MN) e 'nodi controllati' (CN) su bus condiviso**

ne prestabilito dal protocollo. Nella sua forma più semplice il passaggio avviene seguendo un percorso ad anello (fisico o logico) e non è necessariamente deterministico dal punto di vista temporale. Tuttavia, se si fa in modo che l'intervallo di tempo a disposizione di ciascun nodo abbia estremi ben precisi, come avviene nei protocolli 'timed-token', è possibile arrivare a un'equa distribuzione del canale in maniera del tutto simile a quanto avviene con il Tdma. RT-EP (Real Time Ethernet Protocol) è un protocollo basato su Ethernet che implementa un meccanismo di controllo deterministico per passaggio di token e scansione delle priorità.

I dispositivi RT-EP sono disposti su un anello logico in cui ogni nodo sa quali sono il nodo precedente e quello successivo. L'accesso al bus avviene in due fasi successive: nella prima (arbitraggio) il token viene passato tra tutti i nodi dell'anello in sequenza affinché venga aggiornato con i dati del nodo che ha il messaggio con la priorità più